

На правах рукописи

Патраков Александр Евгеньевич

**Кинетика двумерных электронов в
постоянном магнитном поле в присутствии
микроволнового излучения**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург

2008

Работа выполнена в отделе теоретической и математической физики Института физики металлов УрО РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Ляпилин Игорь Иванович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Москвин Александр Сергеевич
кандидат физико-математических наук,
доцент Новокшионов Сергей Георгиевич

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Уральский государственный
технический университет — УПИ»

Защита состоится «_____» _____ 2008 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.286.01 при ГОУ ВПО «Уральский государственный университет им. А. М. Горького», по адресу: 620000, г.Екатеринбург, проспект Ленина, 51, комн. 248

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Уральский государственный университет им. А. М. Горького».

Автореферат разослан «_____» _____ 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук,

старший научный сотрудник

Кудреватых Н.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Свойства двумерного электронного газа с высокой подвижностью, связанные с явлениями переноса в магнитном поле в полупроводниковых гетероструктурах, имеют важное значение как для фундаментальной науки [1], так и для приложений, в частности, для спинтроники [2]. Открытие и исследование некоторых из этих свойств отмечено нобелевскими премиями. Фактически, возникла новая активно развивающаяся область исследований.

В 2002 году в двумерном электронном газе с высокой ($\sim 10^7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) подвижностью в гетероструктурах GaAs/AlGaAs был обнаружен новый тип осцилляций продольного магнетосопротивления, вызванный микроволновым излучением [3]. В отличие от известных осцилляций Шубникова — де Гааза, которые зависят от отношения химического потенциала к циклотронной частоте, вызванные излучением осцилляции зависят от отношения частоты излучения к циклотронной частоте. С увеличением интенсивности излучения минимальные значения сопротивления приближаются к нулю. Существование осцилляций магнетосопротивления двумерного электронного газа и состояний с нулевым сопротивлением в дальнейшем было подтверждено другими экспериментальными группами [4–6].

Для объяснения нового типа осцилляций были предложены различные теоретические модели ([7] и ссылки там), однозначного выбора между которыми провести в настоящее время невозможно. Некоторые из моделей основаны на действии микроволнового излучения на процессы рассеяния электронов вдоль или против направления слабого постоянного поля. Существуют и альтернативные объяснения, связывающие наблюдаемые эффекты с нетривиальной зависимостью неравновесной функции

распределения от энергии, которая под действием внешнего микроволнового излучения приобретает осциллирующий характер.

В предложенных моделях, посвященных влиянию микроволнового излучения на процессы рассеяния электронов, полностью игнорируется тот факт, что двумерная электронная система является принципиально неравновесной, так как ее гамильтониан зависит от времени. Строгое описание неравновесного отклика двумерной электронной системы на измерительное электрическое поле требует дополнительного рассмотрения.

В существующих моделях не исследовано влияние магнитной компоненты микроволнового излучения на кинетические коэффициенты двумерного электронного газа. Действительно, за счет спин-орбитального взаимодействия, которое фундаментально по своей природе и существует в большей или меньшей степени во всех материалах, поглощение энергии электромагнитного излучения может осуществляться не только трансляционными, но и спиновыми степенями свободы электронов за счет целого класса новых резонансных переходов. Естественнo предположить, что эти переходы в сочетании с процессами рассеяния электронов могут привести к новому типу осцилляций фотопроводимости двумерного электронного газа.

Целью настоящей работы является теоретическое исследование влияния микроволнового излучения (как электрической, так и магнитной его компоненты) на кинетические коэффициенты неравновесного двумерного электронного газа со спин-орбитальным взаимодействием, помещенного в постоянное, перпендикулярное его плоскости магнитное поле.

Для достижения поставленной цели необходимо рассмотреть квантовомеханическую систему, состоящую из подсистемы свободных носителей заряда (возможно, со спин-орбитальным взаимодействием) в магнит-

ном поле, подсистемы рассеивателей, взаимодействия электронов с рассеивателями, взаимодействия электронов проводимости с переменным электрическим или магнитным полем, а также их взаимодействия с внешним постоянным электрическим полем, неравновесный линейный отклик на которое требуется найти.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Развита теория линейного отклика неравновесного двумерного электронного газа на слабое измерительное электрическое поле. В основе построенной теории лежат метод канонических преобразований и метод неравновесного статистического оператора. Теория методически строго учитывает неравновесность двумерного электронного газа, вызванную переменным электромагнитным полем.
- Теоретически исследовано влияние спин-орбитального взаимодействия как канала передачи энергии между кинетической и спиновой подсистемами, приводящего к резонансным переходам на целочисленных линейных комбинациях циклотронной и зеемановской частот (т.е. к комбинированному резонансу), на возникновение осцилляций диагональных компонент тензора проводимости двумерного электронного газа.

Практическая ценность работы состоит в том, что она расширяет существующие представления о влиянии микроволнового излучения на кинетические коэффициенты двумерного электронного газа. Рассмотренный в данной работе способ управления проводимостью двумерного электронного газа со спин-орбитальным взаимодействием путем воздействия микроволнового излучения на спиновые степени свободы электронов и передачи энергии от них кинетическим степеням свободы может

найти применение в спинтронике.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Построена теория линейного отклика неравновесного двумерного электронного газа на слабое измерительное электрическое поле, объясняющая осциллирующую зависимость магнетосопротивления двумерного электронного газа от отношения частоты излучения к циклотронной частоте. Показано, что осцилляции магнетосопротивления двумерного электронного газа вызваны переходами электронов проводимости между уровнями Ландау с одновременным их рассеянием, которое ведет к смещению центров циклотронных орбит.
2. В рамках развитой теории осцилляций фотопроводимости двумерного электронного газа, вызванных электрической компонентой микроволнового излучения, получены следующие выводы, согласующиеся с экспериментом:
 - продемонстрирована осциллирующая зависимость фотосопротивления двумерного электронного газа с достаточно высокой подвижностью электронов ($2.5 \cdot 10^7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) от обратного магнитного поля при частоте микроволнового излучения 50 GHz и отсутствие осцилляций фотосопротивления при меньшей подвижности ($10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$);
 - показано, что подвижность двумерных электронов менее $10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ не является препятствием для наблюдения осцилляций сопротивления двумерного электронного газа при более высокой частоте излучения (150 GHz);

- найдено, что знак фототока противоположен знаку отклонения частоты излучения от ближайшей гармоники циклотронной частоты.

3. Показано, что осцилляции фотосопротивления двумерного электронного газа со спин-орбитальным взаимодействием могут быть вызваны не только электрической, но и магнитной компонентой микроволнового излучения. Знак фототока в этом случае также противоположен знаку отклонения частоты излучения от ближайшей гармоники циклотронной частоты.

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов диссертации обеспечивается применением метода неравновесного статистического оператора, который является стандартным методом для нахождения линейного отклика неравновесной системы на внешнее возмущение.

Личный вклад автора. Диссертант участвовал вместе с научным руководителем в постановке задач, выборе методов их решения, в обсуждении и интерпретации полученных результатов.

В представляемой научно-исследовательской квалификационной работе лично диссертантом проведены канонические преобразования гамильтониана, применен метод неравновесного статистического оператора и проведены численные расчеты по полученным формулам.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на следующих конференциях: XV Уральская зимняя школа по физике полупроводников (Екатеринбург, 2004), XXX Международная зимняя школа физиков-теоретиков (Екатеринбург, 2004), Nanoscale properties of condensed matter probed by resonance phenomena (Казань, 2004), VII Российская конференция по физике полупроводников (Звенигород, 2005), VI Моло-

дежный семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (Екатеринбург, 2005), XXXI Международная зимняя школа физиков-теоретиков (Екатеринбург, 2005), 34 совещание по физике низких температур (НТ-34, Ростов на Дону, 2006), Научная сессия Института физики металлов УрО РАН по итогам 2005 года (Екатеринбург, 2006), Научная сессия Института физики металлов УрО РАН по итогам 2006 года (Екатеринбург, 2007), VIII Российская конференция по физике полупроводников (Екатеринбург, 2007).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 7 работах: в 4 статьях в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, 2 статьях в журнале «Физика низких температур» и в трудах конференции.

Структура и объем диссертации. Диссертация содержит введение, 3 главы и основные выводы. Объем диссертации составляет 101 страницу, включая 19 рисунков. Список литературы содержит 26 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, кратко описаны основные особенности осцилляций магнетосопротивления двумерного электронного газа в присутствии микроволнового излучения, представлен план диссертации. Сформулирована цель работы и указано на возможное практическое применение результатов.

Первая глава содержит обзор экспериментальных и теоретических работ по осцилляциям фотосопротивления двумерного электронного газа. В разделе 1.1 изложены результаты основополагающих работ [3, 4], в которых описан новый вид осцилляций сопротивления двумерного элек-

тронного газа в присутствии микроволнового излучения. Приведена зависимость диагональной компоненты тензора сопротивления двумерного электронного газа от частоты излучения, напряженности постоянного магнитного поля и температуры. Осцилляционный эффект наблюдается при условиях $\hbar/\tau \ll T \simeq \hbar\omega_c \leq \hbar\omega \ll \zeta$ из которых следует, что он имеет квазиклассическую природу. Здесь τ — время релаксации импульса, $\omega \geq \omega_c$ — частота излучения и циклотронная частота, ζ — энергия Ферми, T — температура, выраженная в энергетических единицах. Положения j -х минимумов и максимумов ($^{\pm}$, соответственно) можно при $j \gtrsim 4$ описать формулой $\varepsilon_j^{\pm} = j \mp 1/4$, где $\varepsilon \equiv \omega/\omega_c$ и j — целое положительное число.

В разделе 1.2 рассмотрен механизм осцилляций магнетосопротивления двумерного электронного газа, связанный с влиянием микроволнового излучения на вероятности рассеяния электронов со смещением центра циклотронной орбиты в направлении внешнего постоянного электрического поля или в противоположном направлении. Теория, построенная во второй и третьей главах настоящей диссертации, является развитием модели, изложенной в разделе 1.2.

В разделе 1.3 изложен альтернативный механизм возникновения осцилляций магнетосопротивления двумерного электронного газа в присутствии микроволнового излучения. Этот механизм основан на влиянии микроволнового излучения на функцию распределения электронов, которая под действием излучения становится осциллирующей функцией энергии.

Общим результатом моделей, изложенных в разделах 1.2 и 1.3, является существование режимов магнитного поля и мощности микроволнового излучения, для которых диагональная компонента тензора проводимости, вычисленная в теории линейного отклика, отрицательна. Однако,

при тех значениях циклотронной частоты и частоты микроволнового излучения, при которых рассмотренные в разделах 1.2 и 1.3 модели дают отрицательную проводимость, экспериментально наблюдается состояние с нулевым сопротивлением или нулевой проводимостью. В разделе 1.4 показано, что в таком режиме состояние с пространственно однородным распределением тока неустойчиво. Показано, каким образом за счет образования доменов плотности тока реализуются экспериментально наблюдаемые состояния с нулевым сопротивлением двумерного электронного газа.

В разделе «**Постановка задачи**» подведены итоги сделанного обзора и отмечены недостатки существующих теорий осцилляций магнетосопротивления двумерного электронного газа. На основании этого сформулированы задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** исследуется проводимость двумерного электронного газа, выведенного из состояния равновесия микроволновым излучением. Рассматривается система двумерных носителей заряда и рассеивателей (примесей) в проводящем кристалле, помещенном в постоянное магнитное $(0, 0, B)$ и электрические постоянное $\mathbf{E} = (E_x, 0, 0)$ и переменное $\mathbf{E}(t) = (E_x(t), E_y(t), 0) = E_0 \text{Re}(\boldsymbol{\varepsilon} e^{i\omega t})$ поля. Здесь E_0 — амплитуда переменного поля, $\boldsymbol{\varepsilon}$ — комплексный вектор с единичной нормой, определяющий поляризацию микроволнового излучения, ω — частота излучения. Построенная модель включает вклады от квантования Ландау и от микроволнового излучения (в длинноволновом пределе) точным образом, без использования теории возмущений.

Задача представляет собой классический вариант теории отклика неравновесной системы на слабое измерительное поле. Действительно, под действием СВЧ излучения в рассматриваемой системе формируется неравновесное состояние. Задача заключается в нахождении отклика такой,

в принципе сильно неравновесной системы, на слабое измерительное поле. Для ее решения применяется метод неравновесного статистического оператора.

Гамильтониан рассматриваемой задачи представлен в следующем виде:

$$H(t) = H_e + H_v + H_{ev} + H_{ef}(t) + H_{ef}^0, \quad (1)$$

Здесь

$$H_e = \sum_i \frac{p_i^2}{2m} = \sum_i \frac{(\mathbf{P}_i - (e/c)\mathbf{A}_i)^2}{2m}, \quad (2)$$

— гамильтониан свободных носителей заряда в магнитном поле. m — эффективная масса, e — заряд электрона, p_i^α — компонента кинетического импульса электронов, \mathbf{A} — векторный потенциал. H_v — гамильтониан решетки, H_{ev} — гамильтониан взаимодействия электронов с рассеивателями (в данном случае — с примесями):

$$H_{ev} = \sum_{\mathbf{q}j} V(\mathbf{q})\rho(\mathbf{q})e^{i\mathbf{q}\mathbf{r}_j}, \quad (3)$$

$$\rho(\mathbf{q}) = \sum_i e^{-i\mathbf{q}\mathbf{R}_i}, \quad \langle \rho(\mathbf{q})\rho(\mathbf{q}') \rangle = \delta_{\mathbf{q}+\mathbf{q}',0}N_i \quad (4)$$

Здесь \mathbf{R}_i — радиус-вектор i -й примеси, N_i — концентрация примесей, усреднение производится по всем возможным положениям всех примесей.

$H_{ef}(t)$ — гамильтониан взаимодействия электронов проводимости с переменным электрическим полем, а H_{ef}^0 описывает взаимодействие с внешним постоянным электрическим полем \mathbf{E} , отклик на которое нас и будет интересовать.

$$H_{ef}(t) = -eE^\alpha(t) \sum_i x_i^\alpha, \quad H_{ef}^0 = -eE^\alpha \sum_i x_i^\alpha. \quad (5)$$

Рассеяние на примесях рассматривается по теории возмущений. По отношению к состояниям Ландау — Флоке, воздействие примесей эквива-

лентно действию когерентного осциллирующего поля, которое вызывает переходы, являющиеся существенными для воспроизведения осциллирующего характера магнетосопротивления.

Глава устроена следующим образом. В разделе 2.2 рассмотрено каноническое преобразование гамильтониана, записанного в разделе 2.1, которое позволяет избежать рассмотрения задачи о реакции системы на переменное электрическое поле излучения, в общем случае не являющееся малым возмущением. С использованием этого канонического преобразования построен явный вид волновой функции электрона во взаимно перпендикулярных постоянном магнитном и переменном электрическом полях, что составляет содержание раздела 2.3. В результате канонического преобразования, как показано в разделе 2.4, гамильтониан электрон-примесного взаимодействия приобретает явную временную зависимость:

$$\tilde{H}_{ev}(t) = \sum_q V(q)\rho(q)e^{i\mathbf{q}\mathbf{r}} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \left(\frac{\Delta}{i|\Delta|} e^{i\omega t} \right)^l J_l(|\Delta|), \quad (6)$$

где J_l — функция Бесселя,

$$\Delta = \frac{eE_0}{m\omega(\omega_c^2 - \omega^2)} (\omega(q_x\varepsilon_x + q_y\varepsilon_y) + i\omega_c(q_x\varepsilon_y - q_y\varepsilon_x)). \quad (7)$$

В разделе 2.5 изложены основные положения метода неравновесного статистического оператора и теории линейного отклика неравновесной системы, которая в разделе 2.6 применяется к канонически преобразованной системе. Здесь же приведены основные результаты для тензора магнетосопротивления. Наконец, результаты численного анализа, представленные в разделе 2.7, показывают осциллирующее поведение ρ_{xx} с состояниями с отрицательным сопротивлением (см. рис. 1).

Найдено, что вызванная излучением поправка к ρ_{xx} исчезает при $\epsilon = \omega/\omega_c = j$ при целых j . Осцилляции имеют минимумы при $\epsilon = j + \delta$ и максимумы при $\epsilon = j - \delta$, где поправка $\delta \approx 1/5$.

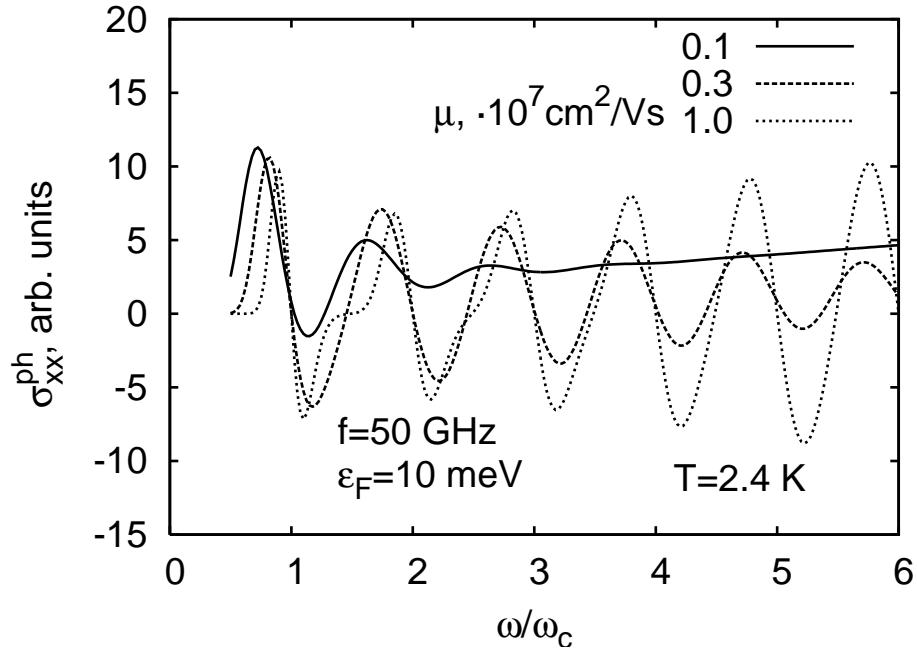


Рис. 1. Зависимость фотопроводимости двумерного электронного газа от отношения ω/ω_c при частоте излучения 50 GHz

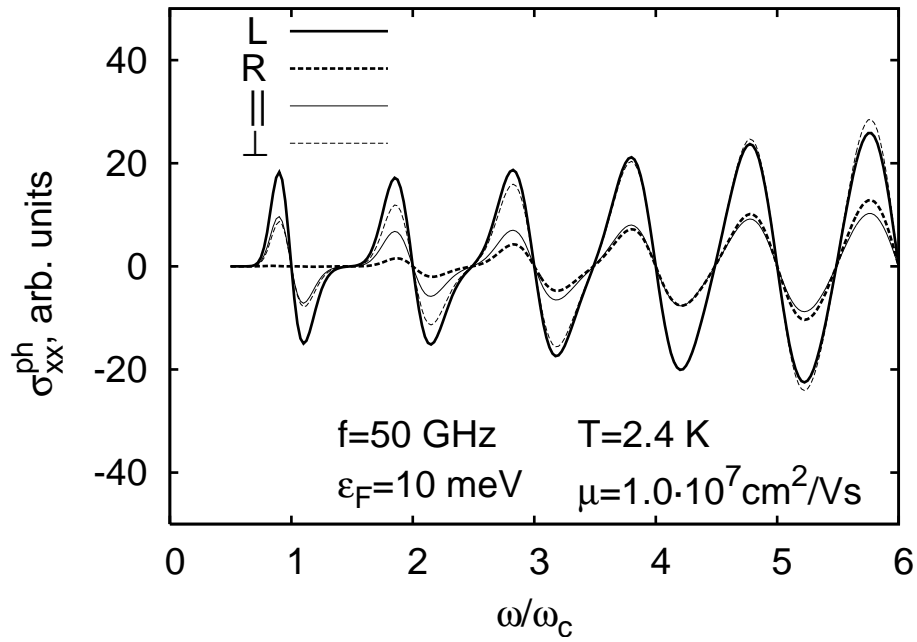


Рис. 2. Зависимость фотопроводимости двумерного электронного газа от отношения ω/ω_c для различных поляризаций излучения

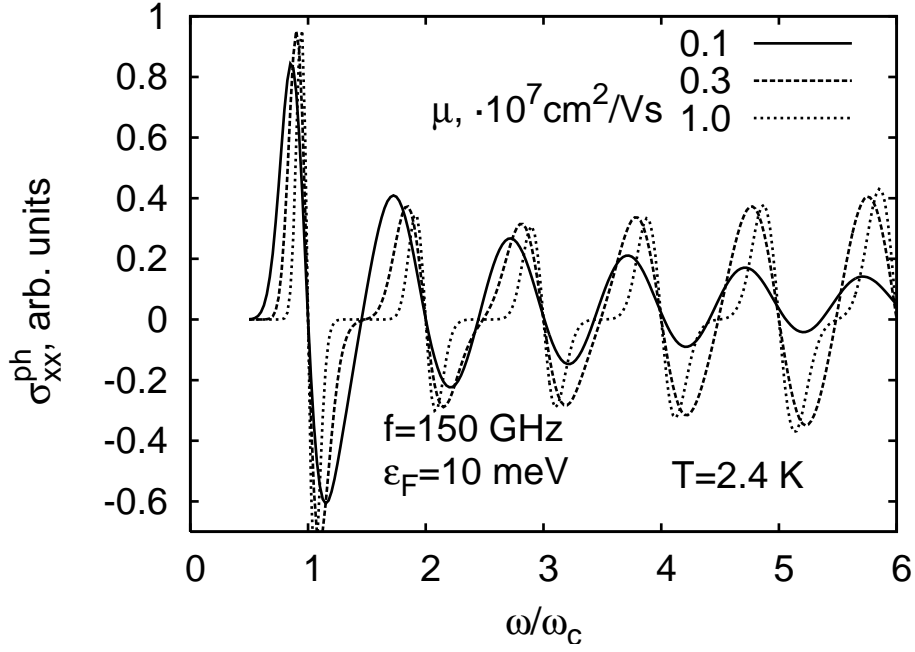


Рис. 3. Зависимость фотопроводимости двумерного электронного газа от отношения ω/ω_c при частоте излучения 150 GHz

Вычисления выполнены для различных поляризаций электрического поля (см. рис. 2). Изучена роль величины подвижности на осцилляции магнетосопротивления.

Показано, что в образцах с меньшей подвижностью осцилляции магнетосопротивления также должны иметь место, но при более высоких частотах излучения (см. рис. 3). Этот вывод подтверждается недавними экспериментальными результатами [6].

В рамках данного подхода сравнительно просто может быть рассмотрена роль многофотонных переходов.

В **третьей главе** исследуется влияние спин-орбитального взаимодействия на осцилляции фотопроводимости двумерного электронного газа.

Спин-орбитальное взаимодействие в структурах, не имеющих центра инверсии, приводит к снятию двукратного вырождения спектра носителей заряда и различию энергий состояний частиц с квазиимпульсами

\mathbf{p} и $-\mathbf{p}$. В двумерных электронных системах инверсионная асимметрия обусловлена несколькими причинами. Во-первых, исходный трехмерный полупроводниковый кристалл может не иметь центра инверсии. Тогда говорят о спин-орбитальном взаимодействии Дрессельхауза. Во-вторых, даже из полупроводникового кристалла с центром инверсии можно изготовить несимметричную квантовую яму. В этом случае говорят о спин-орбитальном взаимодействии Рашбы.

В разделе 3.1 приведен явный вид гамильтонианов взаимодействий Дрессельхауза и Рашбы, а также вывод выражения для энергетического спектра электронов со спин-орбитальным взаимодействием Рашбы в постоянном магнитном поле.

Для решения поставленной задачи рассмотрена система двумерных электронов со спин-орбитальным взаимодействием и рассеивателей (немагнитных примесей) в проводящем кристалле, помещенном в постоянное магнитное $\mathbf{H} = (0, 0, H)$, постоянное электрическое $\mathbf{E} = (E_x, 0, 0)$ и переменное магнитное $\mathbf{H}(t) = (H_x(t), H_y(t), H_z(t))$ поля. Гамильтониан рассматриваемой системы имеет вид:

$$\mathcal{H}(t) = H_k + H_s + H_{ks} + H_{eh}(t) + H_{ef}^0 + H_v + H_{ev}. \quad (8)$$

Здесь H_k , H_s — кинетическая и зеемановская энергии в магнитном поле \mathbf{H} :

$$H_k = \sum_i \frac{\mathbf{p}_i^2}{2m} = \sum_i \frac{(\mathbf{P}_i - (e/c)\mathbf{A}(x_i))^2}{2m}, \quad H_s = \hbar\omega_s \sum_i S_i^z. \quad (9)$$

S_i^α и p_i^α — компоненты оператора спина и кинетического импульса i -го электрона, причем $\omega_s = g\mu_0 H/\hbar$, $\omega_c = eH/mc$, μ_0 — магнетон Бора. H_{ef}^0 — гамильтониан взаимодействия электронов с электрическим полем \mathbf{E} :

$$H_{ef} = -e\mathbf{E} \sum_i \mathbf{r}_i. \quad (10)$$

$H_{eh}(t)$ — гамильтониан взаимодействия электронов с переменным магнитным полем:

$$H_{eh}(t) = -g\mu_0 \mathbf{S} \mathbf{H}(t). \quad (11)$$

H_{ev} , H_v — гамильтониан взаимодействия электронов с решеткой и гамильтониан решетки соответственно. $H_{ks}(p)$ — гамильтониан спин-орбитального взаимодействия.

Непосредственное решение поставленной задачи с гамильтонианом (8) затруднено в связи с большим количеством взаимодействующих (и, следовательно, недостаточно хорошо определенных) подсистем. Подсистемы и их взаимодействия условно изображены на рис. 4а. В случае слабого спин-орбитального взаимодействия значительное упрощение задачи достигается, как показано в разделе 3.2, путем проведения канонического преобразования гамильтониана, которое устраняет спин-орбитальное взаимодействие в линейном приближении. При этом преобразуются и все остальные члены гамильтониана, описывающие взаимодействие электронов с решеткой и внешними полями, если таковые имеются. В этом случае возникает эффективное взаимодействие электронов системы с внешними полями, приводящее к резонансному поглощению энергии поля не только на частоте парамагнитного резонанса ω_s и циклотронного резонанса ω_c , но также и на других частотах, представляющих собой целочисленные линейные комбинации частот ω_s и ω_c — комбинированный резонанс. Введение эффективного взаимодействия значительно упрощает рассмотрение комбинированных переходов за счет сокращения числа взаимодействующих подсистем.

В случае, если H_{ks} — взаимодействие Рашбы, гамильтониан эффективного взаимодействия кинетических степеней свободы электронов про-

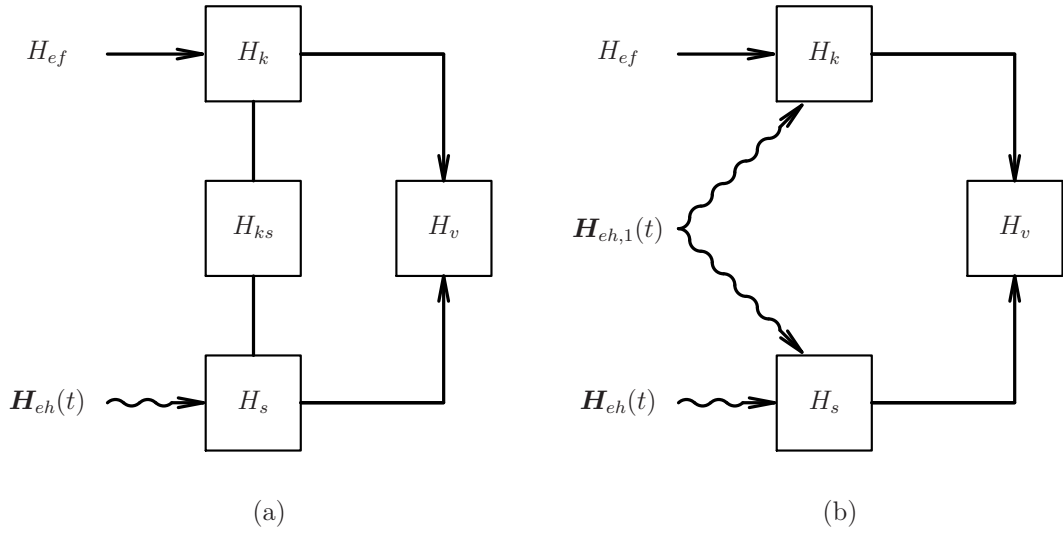


Рис. 4. Подсистемы и их взаимодействия: (a) — до канонического преобразования, (b) — после канонического преобразования.

водимости с переменным магнитным полем имеет вид:

$$H_{eh,1}(t) = \frac{ig\alpha\mu_0}{2\hbar(\omega_c - \omega_s)} \{ (T^{z-} H^+(t) - T^{z+} H^-(t)) + (T^{-+} - T^{+-}) H^z(t) \}, \quad T^{\alpha\beta} = \sum_i S_i^\alpha p_i^\beta. \quad (12)$$

Переходы, ответственные за циклотронный, парамагнитный и комбинированный резонансы, схематически изображены на рис. 5. Взаимодействия подсистем, существующие в канонически преобразованном гамильтониане, схематически представлены на рис. 4b.

В разделе 3.3 изучен отклик электронной системы на постоянное измерительное электрическое поле в случае, когда исходная неравновесность электронной системы, создаваемая переменным магнитным СВЧ полем, обусловлена отклонением от равновесного состояния спиновой подсистемы. Для этого проведено еще одно каноническое преобразование, устраняющее эффективное взаимодействие трансляционных степеней свободы электронов с переменным магнитным полем, поскольку зависимость этого взаимодействия от времени приводит к «техническим»

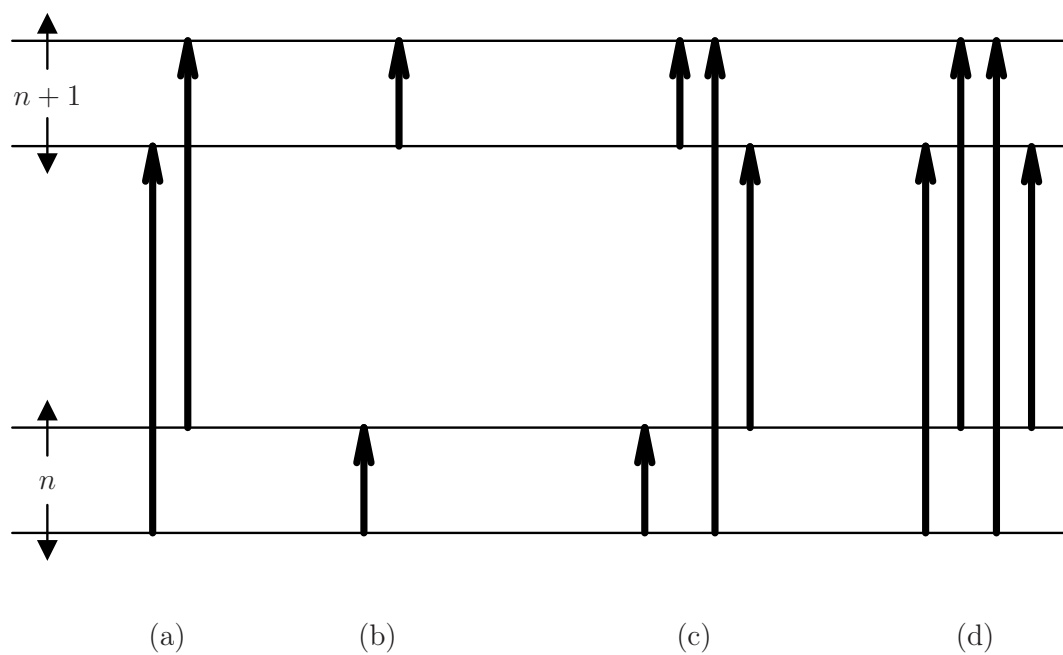


Рис. 5. Переходы, которые происходят в двумерном электронном газе под действием переменного электромагнитного поля: (а) циклотронный резонанс под действием переменного электрического поля, (б) парамагнитный резонанс под действием переменного магнитного поля, (с) комбинированный резонанс под действием переменного электрического поля, (д) комбинированный резонанс под действием переменного магнитного поля.

трудностям. В результате этого канонического преобразования происходит перенормировка взаимодействия электронов с рассеивателями, т.е. гамильтониан этого взаимодействия приобретает временную зависимость. Однако, он содержит малый параметр $V(q)$ (фурье-образ потенциала отдельной примеси), что и приводит к упрощению вычислений.

Основным результатом раздела 3.3 являются выражения для вызванной микроволновым излучением поправки к обратному времени релаксации импульса электронов. Рассмотрены два варианта поляризации микроволнового излучения, а также случаи, когда имеет место спин-орбитальное взаимодействие Раппбы или Дрессельхауза. В разделе 3.4 отмечено, что во всех рассмотренных случаях эти выражения (а значит, и выражения для диагональной компоненты тензора проводимости двумерного электронного газа) содержат один и тот же множитель, который является осциллирующей функцией обратного магнитного поля. Построены графики зависимости этого множителя от напряженности постоянного магнитного поля для двух значений подвижности электронов (рис. 6 и 7).

Таким образом, в главе 3 показано, что спин-орбитальное взаимодействие в системе двумерных электронов проводимости, действующее как канал передачи энергии от спиновой подсистемы к подсистеме трансляционных степеней свободы, приводит к существенному изменению кинетических коэффициентов, зависящих от трансляционных степеней свободы, и, в частности, вызывает осцилляции тензора проводимости как функции магнитного поля.

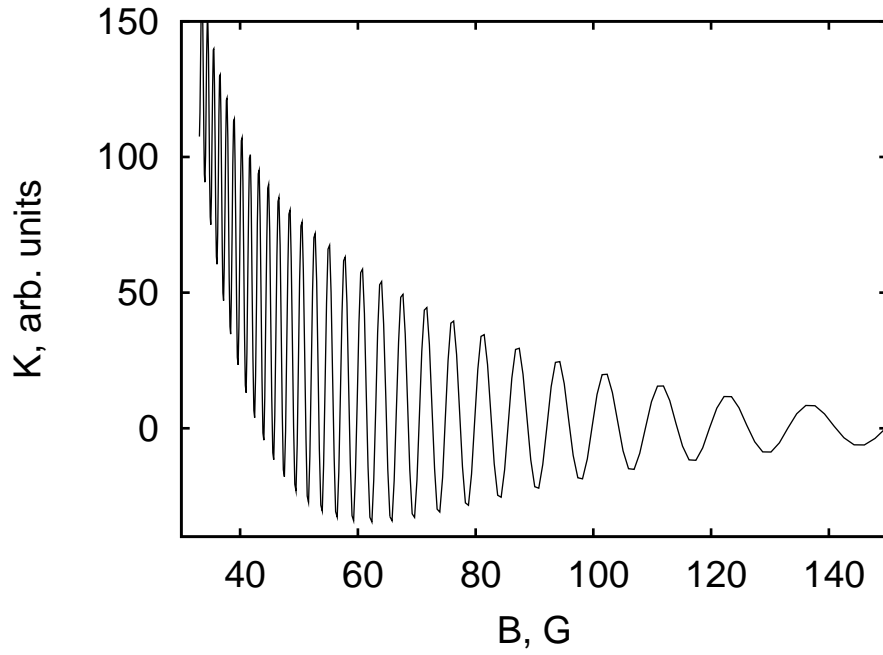


Рис. 6. Зависимость осциллирующего множителя в фотопроводимости двумерного электронного газа от индукции магнитного поля при частоте излучения 50 GHz и подвижности двумерных электронов $\mu = 1.0 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

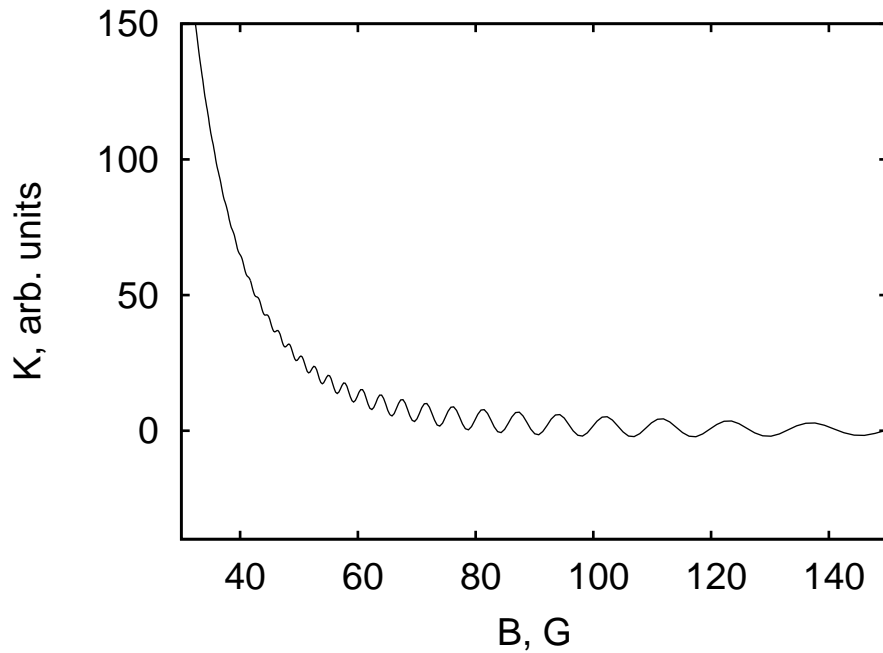


Рис. 7. Зависимость осциллирующего множителя в фотопроводимости двумерного электронного газа от индукции магнитного поля при частоте излучения 50 GHz и подвижности двумерных электронов $\mu = 0.6 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

Основные выводы диссертационной работы

1. Построена теория линейного отклика неравновесного двумерного электронного газа на слабое измерительное электрическое поле в присутствии СВЧ излучения, объясняющая осциллирующую зависимость магнетосопротивления электронного газа от частоты излучения.
2. В рассмотренной модели, осцилляции фотосопротивления обусловлены переходами электронов проводимости между уровнями Ландау с одновременным их рассеянием. Основные результаты теории (о периоде осцилляций по обратному магнитному полю и их фазе; зависимости амплитуды осцилляций от частоты СВЧ излучения и подвижности электронов) согласуются с экспериментальными данными.
3. Определена зависимость фотопроводимости двумерного электронного газа от подвижности электронов и поляризации микроволнового излучения. Показано, что для увеличения амплитуды осцилляций фотопроводимости при заданной частоте излучения следует использовать левую круговую поляризацию излучения и образцы с достаточно высокой подвижностью электронов (более $10^7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ при частоте излучения 50 GHz).
4. Теоретически предсказана возможность реализации осцилляций фотопроводимости в образцах с меньшей подвижностью двумерного электронного газа ($10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$), но при более высокой частоте микроволнового излучения (150 GHz). Данный вывод подтвержден экспериментально [6].
5. Впервые изучено влияние спин-орбитального взаимодействия на

фотосопротивление двумерного электронного газа в СВЧ магнитном поле. В рамках рассмотренной выше модели, установлено, что комбинированные переходы электронов, реализующиеся в данной ситуации, также приводят к осциллирующей зависимости фотосопротивления от магнитного поля. Определены основные характеристики осцилляций (период по обратному магнитному полю, их фаза и др.).

Работа поддержана грантом Фонда содействия отечественной науке по программе «Лучшие аспиранты РАН».

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК

- [А.1] Ляпилин И. И., Патраков А. Е. Кинетика двумерных электронов в магнитном поле в присутствии СВЧ-излучения. Отклик неравновесной системы на слабое измерительное поле. // ФММ. — 2006. — Т. 102. — № 6. — С. 602–610.
- [А.2] Ляпилин И. И., Патраков А. Е. Фотопроводимость двумерной электронной системы со спин-орбитальным взаимодействием в переменном магнитном поле // ЖЭТФ. — 2007. — Т. 132. — № 1. — С. 214–222.
- [А.3] Ляпилин И. И., Патраков А. Е. Осцилляции кинетических коэффициентов в двумерной электронной системе со спин-орбитальным

взаимодействием в переменном магнитном поле // ФТТ. — 2007. — Т. 49. — № 12. — С. 2214–2219.

- [A.4] Lyapilin I. I., Patrakov A. E. Two-dimensional electron system with spin-orbit interaction in ac magnetic field // Phys. Rev. B. — 2007. — Vol. 75. — no. 15. — P. 155320 (7 pages).

Другие публикации

- [A.5] Ляпилин И. И., Патраков А. Е. Проводимость двумерного электронного газа в магнитном поле в присутствии микроволнового излучения // ФНТ. — 2004. — Т. 30. — № 11. — С. 1115–1132.
- [A.6] Ляпилин И. И., Патраков А. Е. Осцилляции фотопроводимости двумерного электронного газа в переменном магнитном поле // Труды 34 совещания по физике низких температур (НТ-34). — Т. 2. — Ростов на Дону: изд-во РГПУ: 2006. — С. 66.
- [A.7] Ляпилин И. И., Патраков А. Е. Осцилляции фотопроводимости двумерной системы Рашбы в переменном магнитном поле // ФНТ. — 2007. — Т. 33. — № 2–3. — С. 187–193.

Цитированная литература

- [1] Ando T., Fowler A. B., Stern F. Electronic properties of two-dimensional systems // Rev. Mod. Phys. — 1982. — Vol. 54. — no. 2. — Pp. 437–672.
- [2] Zutic I., Fabian J., Das Sarma S. Spintronics: Fundamentals and applications // Rev. Mod. Phys. — 2004. — Vol. 76. — no. 2. — Pp. 323–410.

- [3] Mani R. G. et al. Zero-resistance states induced by electromagnetic-wave excitation in GaAs/AlGaAs heterostructures // Nature. — 2002. — Vol. 420. — no. 6916. — Pp. 646–650.
- [4] Zudov M. A. et al. Evidence for a new dissipationless effect in 2D electronic transport // Phys. Rev. Lett. — 2003. — Vol. 90. — no. 4. — P. 046807 (4 pages).
- [5] Dorozhkin S. I. Giant magnetoresistance oscillations caused by cyclotron resonance harmonics // Письма в ЖЭТФ. — 2003. — Т. 77. — № 10. — С. 681–685.
- [6] Быков А. А. и др. Индуцированные микроволновым излучением гигантские осцилляции магнетосопротивления и состояние с нулевым сопротивлением в двумерной электронной системе со средней величиной подвижности // Письма в ЖЭТФ. — 2006. — Т. 84. — № 7. — С. 466–469.
- [7] Vavilov M. G., Aleiner I. L. Magnetotransport in a two-dimensional electron gas at large filling factors // Phys. Rev. B. — 2004. — Vol. 69. — no. 3. — P. 035303 (26 pages).